

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Testy keramických řezných nástrojů  
v podmínkách přerušovaného řezu  
Ceramic Cutting Tool Tests at  
Interrupted Cut Setting

Student:

Martin Sopuch

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Robert Čep, Ph.D.

Ostrava 2010

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra obrábění a montáže

## Zadání bakalářské práce

Student: **Martin Sopuch**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie  
Téma: Testy keramických řezných nástrojů v podmínkách přerušovaného řezu

### Ceramic Cutting Tool Tests at Interrupted Cut Setting

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky.
2. Obráběcí nástroje z řezné keramiky.
3. Experimentální testování nástrojů.
4. Vyhodnocení testů.
5. Technicko ekonomické zhodnocení.
6. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

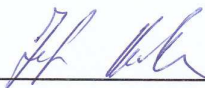
HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Brno : MM Publishing Praha, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.  
ČEP, Robert. *Zkoušky nástrojů z řezné keramiky v podmínkách přerušovaného řezu – disertační práce*. Ostrava : VŠB – TU Ostrava Fakulta strojní, 2005. 101 s.  
WHITNEY, E. Dow. *Ceramics Cutting Tools – Materials, Development and Performance*. Gainesville, Florida : Noyes Publication New Jersey, 1994, 350 p. ISBN 0-8155-1355-0.  
ZAJAC, Jozef; JURKO, Jozef; ČEP, Robert. *Top trendy v obrábění, II. část – Nástrojové materiály*. Žilina : Media/ST, s.r.o Žilina, 2006. 193 s. ISBN 80-968954-2-7.  
VASILKO Karol. *Analytická teória trieskového obrábania*. Prešov : COFIN Prešov, 2007. 338 s. ISBN 978-80-8073-759-7.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Robert Čep, Ph.D.**

Datum zadání: 01.10.2009

Datum odevzdání: 21.05.2010



prof. Dr. Ing. Josef Brychta  
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 14.5.2010 .....

..... Sopuch .....

Martin Sopuch

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 14.5.2010 .....

  
.....  
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Martin Sopuch

Adresa trvalého pobytu autora práce: Ženklava 237

## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

SOPUCH, M. *Testy keramických řezných nástrojů v podmínkách přerušovaného řezu: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2010, 48 s. Vedoucí práce: Ing. Robert Čep, Ph.D.

Bakalářská práce je zaměřena na testování řezných keramických destiček soustružením při přerušovaném řezu. První část bakalářské práce je věnována seznámením s řeznou keramikou (rozdělení, výroba, vlastnosti). Vlastní měření probíhalo na speciálním přípravku pro simulaci přerušovaného řezu. Keramické řezné destičky byly dodány společností Kyocera. Testovány byly čtyři typy destiček (KS6000, PT600M, A66N, A65) při dvou řezných rychlostech ( $v_{c1}=408 \text{ m.min}^{-1}$  a  $v_{c2}=539 \text{ m.min}^{-1}$ ) v rozmezí posuvů  $f=(0,15 - 0,30) \text{ mm}$ . Hloubka řezu činila 1 mm. Testování probíhalo na materiálu 12 050. Cílem bylo sledování počtu rázů v závislosti na řezných podmínkách.

## ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

SOPUCH, M. *Ceramic Cutting Tool Tests at Interrupted Cut Setting: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2010, 48 p. Thesis head: Ing. Robert Čep, Ph.D.

Bachelor work is concentrates on testing a ceramic cutting tools at interrupted cut settings by turning. First part of bachelor work is concentrates on meeting with ceramic cutting tools (classification, production, advantages). Measurement was done at special fixture for interrupted cut setting simulation. Ceramic cutting tools was supplied by company Kyocera. It was tested four types of tools (KS6000, PT600M, A66N, A65) in two cutting speeds ( $v_{c1}=408 \text{ m.min}^{-1}$  and  $v_{c2}=539 \text{ m.min}^{-1}$ ) in range of feed  $f=(0,15 - 0,30) \text{ mm}$ . The depth of cut was 1 mm. It was tested in the steel 12 050. Watch the shock number depending at cutting conditions was the goal of this work.

## OBSAH

<b>SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ, SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>3</b>
<b>ÚVOD A CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE .....</b>	<b>4</b>
<b>1 ŘEZNÁ KERAMIKA.....</b>	<b>5</b>
1.1 Oblasti použití keramických materiálů .....	5
1.2 Historický vývoj .....	6
1.3 Rozdělení a značení řezné keramiky.....	8
1.4 Výroba řezné keramiky.....	10
1.4.1 Obecný postup výroby keramických materiálů .....	10
1.4.2 Výroba oxidové keramiky .....	10
1.4.3 Výroba nitridové keramiky .....	12
1.5 Výchozí materiály a jejich vlastnosti .....	13
1.5.1 Oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) .....	13
1.5.2 Oxid zirkoničitý ( $\text{ZrO}_2$ ) .....	14
1.5.3 Nitrid křemíku ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) .....	14
1.6 Struktura a vlastnosti.....	14
1.6.1 Dělení keramických materiálů podle lomového chování .....	17
1.6.2 Faktory snižující pevnost keramiky.....	17
1.7 Použití řezné keramiky .....	19
1.7.1 Soustružení.....	20
1.7.2 Frézování.....	20
<b>2 METODIKA TESTOVÁNÍ V PODMÍNKÁCH PŘERUŠOVANÉHO ŘEZU .....</b>	<b>21</b>
2.1 Příčné soustružení .....	21
2.2 Podélné soustružení.....	22
2.3 Vliv mechanických rázů .....	23
<b>3 VLASTNÍ METODA ZKOUŠENÍ .....</b>	<b>24</b>
3.1 Řezné parametry.....	24
3.2 Materiál obrobku.....	24
3.3 Testované keramické destičky.....	25
3.4 Obráběcí stroj.....	26
3.5 Přípravek pro simulaci přerušovaného řezu.....	27
3.6 Nástrojový držák.....	27
3.7 Vyhodnocovací zařízení .....	27
3.8 Sledování počtu rázů.....	28
<b>4 VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ ZKOUŠEK.....</b>	<b>29</b>

4.1 Kyocera KS6000 .....	29
4.2 Kyocera PT600M.....	32
4.3 Kyocera A66N .....	35
4.4 Kyocera A65.....	38
<b>5 ZÁVĚREČNÉ SHRnutí .....</b>	<b>42</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>45</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK.....</b>	<b>47</b>

## SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ, SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značení	Význam	Jednotka
KS6000	Typ řezné keramické destičky	-
PT600M	Typ řezné keramické destičky	-
A66N	Typ řezné keramické destičky	-
A65	Typ řezné keramické destičky	-
HIP	Vysokoteplotní izostatické lisování	$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$
D	Obráběný střední průměr	mm
R	Počet rázů	-
$v_c$	Řezná rychlost	-
f	Posuv	mm
$\alpha$	Nízkoteplotní modifikace nitridu křemíku	-
$\beta$	Vysokoteplotní modifikace nitridu křemíku	-
$\rho$	Hustota materiálu	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
$\alpha$	Součinitel délkové roztažnosti	$10^{-6} \text{K}^{-1}$
$a_p$	Hloubka řezu	mm
n	Otáčky vřetene	$\text{min}^{-1}$
l	Obrobená délka	mm



## ÚVOD A CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Na světě existuje v současné době velké množství keramických řezných materiálů od mnoha výrobců. Tyto keramické materiály se postupem času vyvíjely a zdokonalovaly. Dnešní keramické materiály zaznamenaly posun v použitelnosti, zvyšování hodnot řezné rychlosti a odolnosti. Zejména se zdokonalila použitelnost řezné keramiky v podmínkách přerušovaného řezu.

V nejbližší době se neočekává zásadní vývoj v oblasti keramických materiálů. Je důležité se proto zaměřit na zdokonalení technologie výroby, optimalizaci řezných podmínek a rozšíření oblasti používání řezné keramiky. Správná optimalizace a výběr druhu keramické destičky je však závislý na znalosti vlastností dané řezné keramiky. Technolog proto musí být dobře seznámen s výhodami, nevýhodami a vlastnostmi řezné keramiky.

Řezná keramika je čím dál více využívána pro své pozitivní vlastnosti, jako např. vysoká tvrdost, vysoká odolnost vůči teplotám a nízká cena. Pro využití těchto vlastností však potřebujeme stroje, které zajistí dostatečný výkon při obrábění, vysokou přesnost a tuhost stroje.

Tato bakalářská práce si klade za úkol seznámit s možnostmi využití řezné keramiky a přispět k rozšíření řezné keramiky do více oblastí technické praxe, zejména do oblasti obrábění přerušovaným řezem.

Soustružení přerušovaným řezem rozumíme stav, kdy řezný klín střídavě vchází a vychází ze záběru.

Cíle bakalářské práce:

- seznámení s řeznou keramikou (rozdělení, výroba, oblasti použití),
- seznámení a výběr správné metody testování,
- vlastní testování vybraných keramických destiček,
- přispění k rozšíření řezné keramiky.

# 1 ŘEZNÁ KERAMIKA

Podle moderní definice je keramika definovaná jako převážně krystalický materiál, jehož hlavní složkou jsou anorganické sloučeniny nekovového charakteru.[9] Tato charakteristika zahrnuje v sobě tradiční keramiku (porcelán, cihly, cement), brousící materiály a mnoho nových (speciálních, strojírenských, konstrukčních, průmyslových nebo jinak nazývaných) keramických látek, jako jsou oxidická keramika ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{MgO}$  a další), ferity, feroelektrika, nitridy (na bázi Si, B, Al), karbidy (na bázi Si, B), boridy (na bázi Ti) a jiné. Dnešní keramika je charakterizována výrobou z poměrně čistých surovin a chemikálií, jako keramika syntetická. Většina současných (označovaných také jako nových) látek jsou látky krystalické. Tímto se liší od tradiční keramiky (glazura, porcelán), která obsahuje i množství skelné (amorfní) fáze. V keramických látkách se vyskytují meziatomové vazby iontové a kovalentní, zpravidla obě současně. V krystalové struktuře převládají složité kubické a hexagonální mřížky. [1]

Z celkového množství používané obecné keramiky zaujímá řezná keramika relativně malý podíl. Díky svým vlastnostem ale čím dál více proniká do nových oblastí použití. Jedná se totiž o technologicky vyspělé výrobky, které vydrží extrémní podmínky (jako např. vysoká odolnost proti opotřebení, vysoká tepelná stálost, vysoká tvrdost, apod.)

## 1.1 Oblasti použití keramických materiálů

Díky svým vlastnostem se keramika používá zejména v těchto oblastech technické praxe: [6]

- tepelné aplikace (odolnost vůči vysokým teplotám, nízká délková roztažnost, stabilita tvaru při tahu a tlaku i za vysokých teplot, dobrá tepelná vodivost),
- mechanické aplikace (vysoká tvrdost, odolnost proti opotřebení, dobré a stabilní kluzné vlastnosti, vysoká přesnost tvaru, nepřítomnost statického náboje, nízká měrná hmotnost),
- elektrotechnika a elektronika (výborná izolační vlastnosti, vysoká stabilita náboje, velká dielektrická pevnost, vysoký výkon zhašení výboje),
- fyzikální a chemické aplikace (dobrá odolnost vůči kyselinám a louhům, chemická inertnost, dobrá odolnost vůči korozi a erozi, akumulární a pohlcovací schopnost, filtrační schopnosti, velký měrný povrch),

- medicína (biologická sloučitelnost, filtrační schopnost, chemická inertnost a stabilita, velký geometrický a měrný povrch),
- stavebnictví (odolnost vůči horku a mrazu, příjemnost na dotyk, hygienické vlastnosti, plynutěsnost, nepřítomnost statického náboje).

Jednotlivé vlastnosti keramik lze mezi sebou různě kombinovat a měnit podle potřeby. Proto se keramické materiály používají i pro výrobu řezných nástrojů. Zde jsou využívány tyto vlastnosti:

- vysoká tvrdost,
- odolnost vůči mechanickému namáhání a opotřebení,
- odolnost vůči vysokým teplotám,
- vysoká trvanlivost a řezivost,
- vysoká chemická stabilita,
- odolnost vůči chemickým vlivům a korozi,
- nízká měrná hmotnost,
- nízká cena.

## 1.2 Historický vývoj

První keramický nástroj byl zřejmě použit již v době kamenné a i později používal člověk pískovcové bloky s velkým obsahem  $\text{SiO}_2$  k ostření nožů, nůžek, břitů a dalších nástrojů. Na dlouhou dobu se tak staly pískovcové kotouče hlavním brousícím nástrojem až do nedávna, kdy byly nahrazovány modernějšími materiály, jako je diamant nebo  $\text{SiC}$ .

Během II. světové války vyvinula německá firma Degussa vůbec první keramický nástroj na bázi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  použitelný pro řezný nástroj. K většímu rozšíření však nedošlo, protože technologie nebyla propracovaná natolik, aby byl sestrojen nástroj s požadovanými vlastnostmi. [10]

Na základě výzkumu byly na konci 50. let úspěšně uvedeny první keramické materiály na bázi oxidu hlinitého. Odstranily se hlavní nedostatky – hrubozrnná struktura, nízká ohybová pevnost, nízká odolnost proti teplotním rázům. První nástroje obsahovaly oxid hlinitý s malým podílem slinovacích přísad (většinou okolo 1%). Oxid hlinitý má vysokou odolnost vůči opotřebení, nejlepší termochemickou stabilitu z nástrojových

materiálů, ovšem má nízkou odolnost vůči vydrolování ostří. Avšak nedostatek výkonných strojů s potřebným rozsahem otáček bránil širšímu rozšíření řezné keramiky.

Odolnost vůči vydrolování měly zlepšit keramiky typu  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ , vyvinuty začátkem 70. let. Dnes se jedná o nejrozšířenější typ řezné keramiky.

Začátkem 80 let se začaly dostávat na trh keramické nástroje na bázi  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Tyto keramické nástroje lze použít až při dvojnásobné posuvové rychlosti oproti oxidickým keramikám.

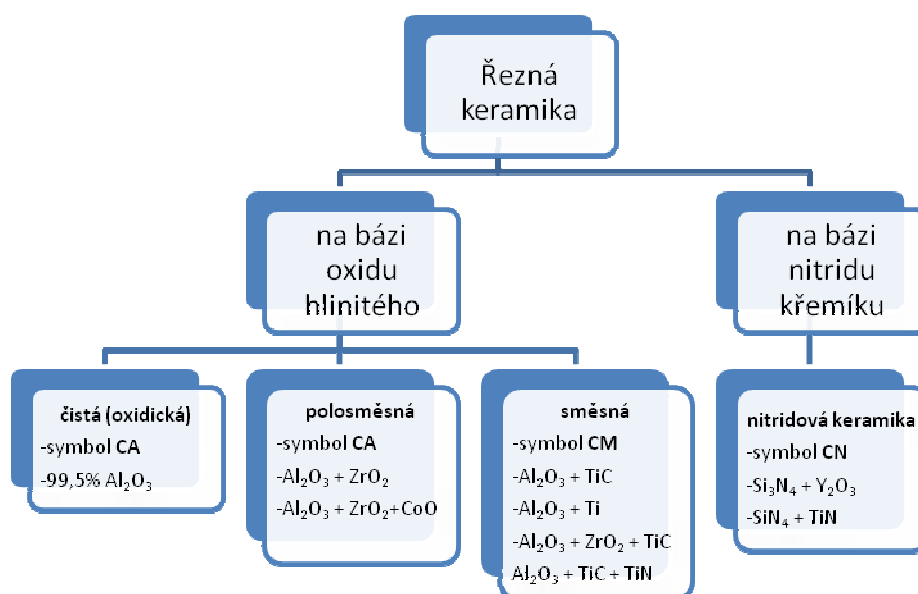
V polovině 80. let došlo k vývoji kompozitů  $\text{Al}_2\text{O}_3$  vyztužených vlákny whiskery ( $\text{SiC}$ ). Přidáním vláken karbidu křemíku se výrazně zvýší odolnost vůči vydrolení a vylamování ostří. Karbid křemíku však má tendenci reagovat se slitinami železa. Tato keramika se vyznačuje vynikajícími řeznými výkony při obrábění superslitin, kde je nebezpečí vylamování ostří. [2]

tab. 1 Vývoj keramických materiálů na bázi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [9]

Charakteristika	Rok	Pevnost v ohybu [MPa]
$\text{Al}_2\text{O}_3$ pro formy a nástroje	1912 – 1913	150 – 250
Slinutý $\text{Al}_2\text{O}_3$	1930 – 1931	200 – 350
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$	1937 – 1938	300 – 400
Vysokoteplotně lisovaný $\text{Al}_2\text{O}_3$	1944 – 1945	500 – 700
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ (0,5-1,0%)	1948 – 1951	300 – 500
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Mo}_2\text{C} + (\text{Mo})$	1951 – 1959	350 – 450
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Ti}$ , $\text{TiC}/\text{WC}$	1955 – 1958	300 – 550
Submikrometrový $\text{Al}_2\text{O}_3$	1968 – 1970	700 – 900
Vysokoteplotně lisovaný $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}/\text{Ni}$		800 - 1000
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$	1970 – 1980	
Vysokoteplotně lisovaný $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiCw}$ (20 – 30 obj. %)	1980	

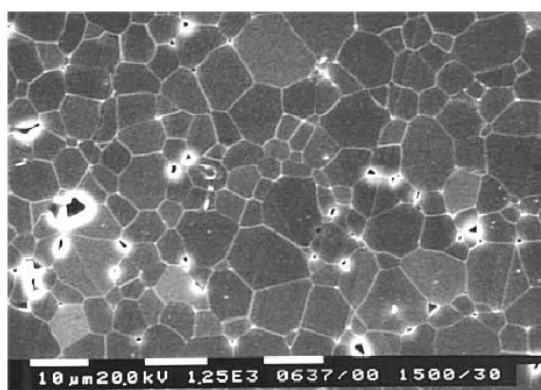
### 1.3 Rozdělení a značení řezné keramiky

Pro rozdělení a značení řezné keramiky neexistuje konkrétní norma (jako např. u slinutých karbidů). Všeobecně se přijímá následující rozdělení: [1]

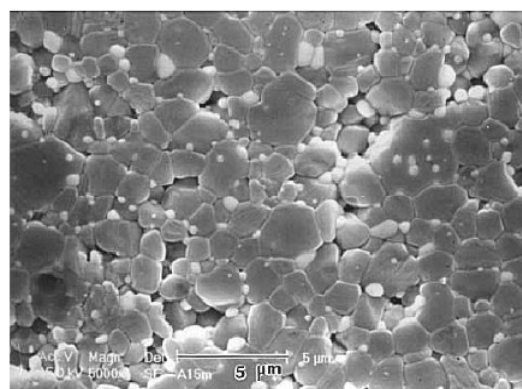


obr. 1 Rozdělení řezné keramiky

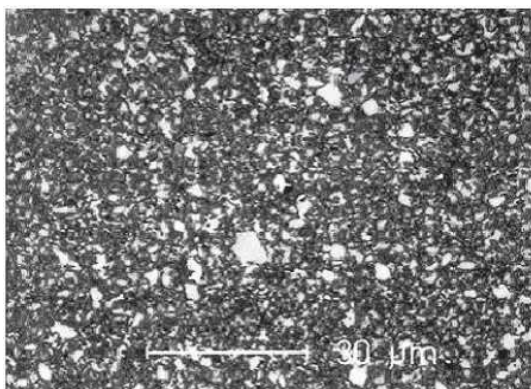
Struktura vybraných druhů keramik:



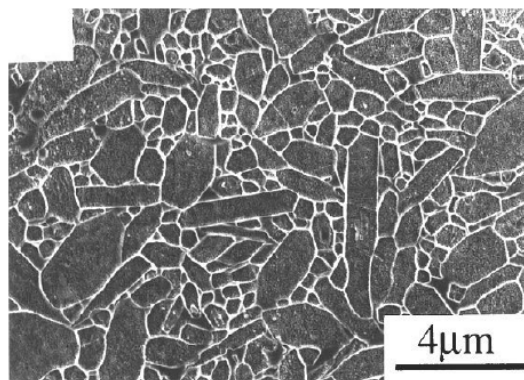
obr. 2 Keramika Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [4]



obr. 3 Keramika Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 15%ZrO<sub>2</sub> [4]



obr. 4 Keramika Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + TiC [4]



obr. 5 Keramika Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> [4]



obr. 6 Keramika typu Sialon [4]

## 1.4 Výroba řezné keramiky

Výroba řezné keramiky je velmi podobná procesu výroby součástí ze slinutých karbidů a cermetů. Rozdíl je však v tom, že keramické materiály neobsahují žádný materiál, jehož funkcí by bylo spojení jednotlivých zrn tvrdé fáze do jednotlivého tělesa. Tento problém znesnadňuje celou výrobu řezné keramiky a klade vysoké nároky na výrobní zařízení a hlavně na dodržení technologického postupu výroby. Přidáním přísad ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiH}_2$  – podle typu keramiky), které během slinovacího procesu vytvářejí kapalnou fázi, lze ovlivnit slinovatelnost keramických materiálů. Tímto je možno dosáhnout hustějšího uspořádání částic, rychlejšího a lepšího zhutnění výrobku. [1]

### 1.4.1 Obecný postup výroby keramických materiálů

- příprava práškové směsi,
- mletí,
- míchání,
- tvarování,
- sušení,
- předsunování,
- slinování,
- tepelné zpracování,
- úpravy povrchu.

### 1.4.2 Výroba oxidové keramiky

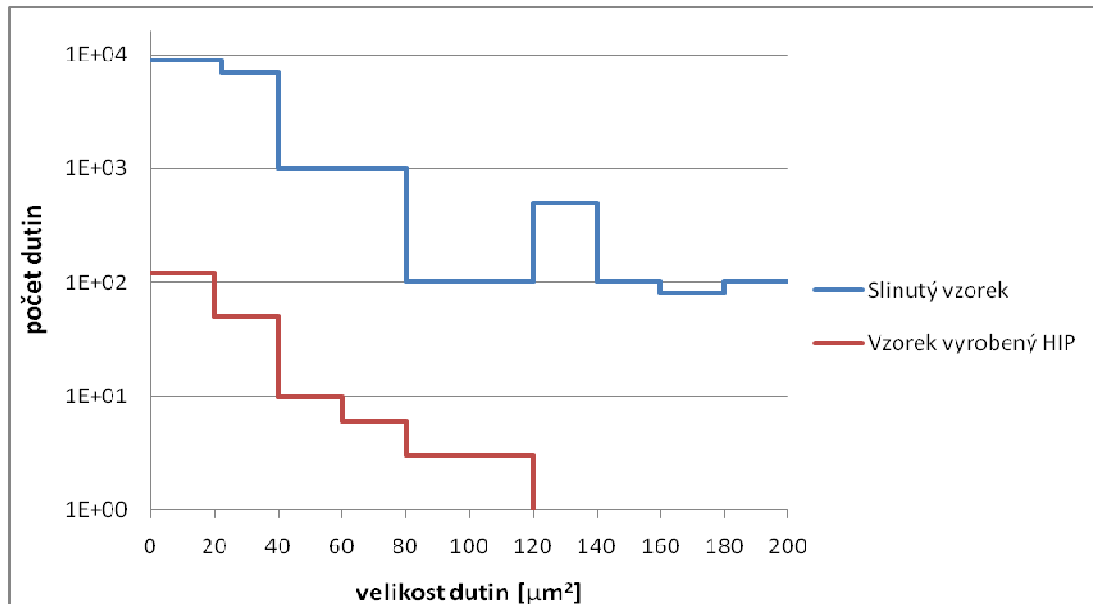
Základní surovinou pro výrobu oxidové keramiky je velmi čistý a jemnozrnný oxid hlinitý –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . K němu se přidávají malá množství pomocných látek. Nejčastěji se jedná např. o oxidy zirkonia, yttria, chromu, titanu, niklu, hořčíku, kobaltu a molybdenu. Pomocné látky mají usnadnit slinování a zabránit růstu zrna.

Nejprve se mokrá směs semele a pak se rozprašováním vysuší. Takto se získá prášek schopný soudržnosti, který se lisováním na automatických lisech přetváří do požadovaného tvaru. Aby bylo zajištěno dobré zhutnění materiálu v celém jeho průřezu,

probíhá lisování obvykle na lisech s oboustranným tlakem. Vibračním lisováním je možno odstranit rozdíly ve zhutňování. Keramické materiály lze vyrábět taky izostatickým lisováním. Tento způsob je založen na principu lisování pomocí hydrostatického tlaku kapaliny, který působí na stěnu tvarovacího pouzdra. Dále lze keramické materiály vyrábět vstřikovacím lisováním nebo litím. Často jsou z prášku tvarovány vytlačněním (extruzí) tyče, ze kterých se pak pomocí diamantové okružní pily řezou jednotlivé destičky.

Po vylisování následuje slinování směsi ve speciálních pecích. Zde dochází ke spojení prášku do tuhého tělesa. V případě potřeby následuje broušení na konečné rozměry a požadovanou kvalitu povrchu. Nejprve jsou keramické materiály předslinovány při teplotě 1100 °C po dobu 2 hodin, pak následuje konečné slinování při teplotě 1550°C po dobu 2 hodin. Předslinování i slinování probíhá za atmosférických podmínek.

Aplikací technologie HIP (vysokoteplotní izostatické lisování) lze zlepšit vlastnosti keramiky (tab. 2). U této technologie je součást stlačována plynem rovnoměrně ve všech směrech (na rozdíl od běžné technologie vysokoteplotního tlakového slinování, kdy je součást stlačována pouze v jedné ose). Tímto se sníží pórovitost materiálů a usnadní se slinování směsi (obr. 7). Dále selepší odolnost vůči únavě a houževnatost. [1]



obr. 7 Počet a velikost dutin a pórů v keramice  $\text{ZrO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$  [15]



### 1.4.3 Výroba nitridové keramiky

Nitrid křemíku se vyskytuje ve dvou krystalových strukturách  $\alpha$  a  $\beta$ , s fází  $\beta$ , která je stabilní za vysokých teplot. Mikrostruktura obou fází je rozdílná. To se dále projevuje v odlišných mechanických vlastnostech –  $\alpha$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$  má oproti  $\beta$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$  vyšší tvrdost a nižší lomovou houževnatost. [13], [14]

Slinování nitridové keramiky  $\text{Si}_3\text{N}_4$  je při atmosférickém tlaku obtížnější než slinování oxidové keramiky – v důsledku nižší samodifuze a teploty rozkladu. Samodifuze zabraňuje dosažení teoretické hustoty materiálu. Vyšší teploty sice mohou podporovat difuzní proces, ale teploty – potřebné pro dostatečnou difuzi, jsou tak vysoké, že dochází k rozkladu materiálu před slinováním. Proto se pro podporu slinování a zhutňování používají různé oxidy kovů, které vytvářejí s nitridem křemíku v průběhu ohřevu tekutou fázi, která zrychluje přemístění hmoty.

Při výrobě keramických materiálů typu Sialon není nutné použít technologie izostatického lisování. Kompaktizace vzorku probíhá za přítomnosti tekuté fáze i bez působení tlaku. Tyto materiály mají poměrně vysokou houževnatost a to i za vysokých teplot. [1]

tab. 2 Vliv HIP na mechanické vlastnosti keramik [12]

Vlastnost	$\text{Al}_2\text{O}_3$		$\text{ZrO}_2$		$\text{Si}_3\text{N}_4$	
	Před HIP	Po HIP	Před HIP	Po HIP	Před HIP	Po HIP
Relativní hustota [%]	97,5	99,8	98,3	99,7	95,7	99,7
Tvrdost [HRA]	93,0	93,7	90,0	91,0	92,5	93,5
Ohybová pevnost [MPa]	490	735	980	1568	980	1176
Lomová Houževnatost [ $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ]	3,0	3,5	7,5	8,0	7,0	7,5

tab. 3 Změna mechanických vlastností keramických materiálů po aplikování metody HIP

[6]

Materiál	Měrná hmotnost [g.cm <sup>-3</sup> ]		Tvrdost [HRA]	
	Slinování	HIP	Slinování	HIP
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,94	3,97	93,3	94,2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +TiC	4,27	4,37	94,2	95,0
Sialon	3,24	3,26	92,7	92,7

## 1.5 Výchozí materiály a jejich vlastnosti

Mezi hlavní výchozí materiály pro výrobu řezných keramik patří oxidy (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>), karbidy (TiC, SiC) a nitridy (TiN, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>). Všechny tyto látky jsou vysoce stabilní s vysokou tvrdostí, tlakovou pevností a odolností vůči vysokým teplotám. [2]

### 1.5.1 Oxid hlinitý (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

Oxid hlinitý se nejčastěji vyrábí z bauxitu Bayerovou metodou – čistota konečného produktu dosahuje hodnot okolo 99,90%.

**Postup výroby: [2]**

- úprava bauxitové suroviny,
- loužení,
- filtrace,
- precipitace,
- kalcinace.

### 1.5.2 Oxid zirkoničitý ( $\text{ZrO}_2$ )

Oxid zirkoničitý dosahuje jen 50% tvrdosti  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , vykazuje však podstatně vyšší houževnatost a ohybovou pevnost. Lze jej vyrobit z křemičitanu draselného ( $\text{ZrSiO}_4$ ) některou z uvedených metod: [1]

- termický rozklad a redukce v elektrické peci ( $2100\div 2300^\circ\text{C}$ ),
- alkalické tavení,
- chlorace (do ohřívané směsi oxidu zirkoničitého a uhlíku se přivádí chlor),
- plazmový hořák (teplota vyšší než  $2600^\circ$ ).

### 1.5.3 Nitrid křemíku ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )

Nitrid křemíku se vyskytuje ve dvou modifikacích  $\alpha$  (nízko-teplotní) a  $\beta$  (vysoko-teplotní). Modifikace  $\beta$  je měkčí než  $\alpha$ , zato má ale vyšší pevnost a lomovou houževnatost.

V současné době se průmyslově využívají tyto metody syntézy nitridu křemíku: [2]

- přímá reakce prvků – nitridace,
- karbotermická redukce a nitridace oxidu křemičitého,
- srážení z plynné fáze,
- teplotní rozklad diimidu křemíku.

## 1.6 Struktura a vlastnosti

Keramika je polykrystalický materiál s malými rozměry zrna (často pod  $1\ \mu\text{m}$ ). Vyznačuje se vysokou tvrdostí, nízkou houževnatostí a nízkou měrnou hmotností. Těmito a dalšími faktory (jako např. struktura, teplotní vodivost, délková roztažnost, omezená tvárnost) jsou určeny finální mechanické vlastnosti keramiky a její potenciální aplikační možnosti.

Tvrdost keramiky nelze přesně definovat, protože více než kterákoliv jiná vlastnost závisí na zkušebních podmínkách. Tvrdost keramiky s narůstající teplotou klesá.

Typickou vlastností keramiky je její křehkost. Keramika není schopna plastické deformace a proto se porušuje křehkým lomem. Postrádá vlastnosti jako tvárnost a houževnatost. [1]

**Příčiny, pro které nenastává v keramických materiálech plastická deformace [1]:**

- nesplnění von Misesova kritéria (špatná manévrovatelnost dislokací při jejich současné dobré pohyblivosti),
- nízká pohyblivost dislokací v důsledku vysokého Peierlsova-Nabarrova napětí, při jejich současné dobré manévrovatelnosti,
- kombinace předchozích dvou příčin (typické zejména pro  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{SiO}_2$ ).

Nedokonalé slinutí a pórovitost patří mezi další příčiny křehkosti keramik – lze je však omezit nebo úplně odstranit.

tab. 4 Teploty tavení a tvrdost podle Vickerse pro vybrané keramické materiály [6]

Materiál	Teplota tavení [°C]	Tvrdost [HV]
$\text{Al}_2\text{O}_3$	2050	2000
$\text{ZrO}_2$	2700	
$\text{Si}_3\text{N}_4$	1900	1000
$\text{SiC}$	2200	2500

tab. 5 Vybrané fyzikální vlastnosti některých keramických materiálů [6]

Vlastnost	Materiály						
	$\text{ZrO}_2$		$\text{SiC}$			$\text{Si}_3\text{N}_4$	
	1	2	3	4	5	4	5
Měrná hmotnost [g.cm <sup>-3</sup> ]	5,7 5,8	6,0 6,1	2,6	3,1 3,2	3,2	2,6	3,1 - 3,3
Pevnost v tahu [MPa]	120	250 500		500			100 - 900
Pevnost v tlaku [MPa]			500 800	2000 3000	3000 4000	1000	3000 6800

Vlastnost		Materiály						
		ZrO <sub>2</sub>		SiC			Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	
		1	2	3	4	5	4	5
Pevnost v ohybu [MPa]	20°C	650 700	>2000	100 300	300 350	500 700	200 250	600 - 850
	800°C	350 370	300 800					
	1000°C							
	1200°C			100 300	400	500 600	20 250	300 - 400
Tvrdost podle Knoop [GPa]		11	13 15		21 27			15 - 18
Modul pružnosti v tahu [GPa]		200	200	240	400	380 440	140 220	210 - 338
Modul pružnosti ve smyku [GPa]								120
Lomová houževnatost [MPa.m <sup>1/2</sup> ]		8,0 15,0	15		2,3 3,5	2,5 4,0	1,0 3,0	4,5 - 6,2
Poissonovo číslo				0,24	0,24	0,24	0,27	0,26 0,28
Součinitel délkové roztlačnosti [10 <sup>-6</sup> .K <sup>-1</sup> ]	20°C	9,0 11,0	10	4,5	3,5 4,0	3,2 4,5	2,7 3,2	3,2 - 3,5
	1100°C	15			5,4			
Měrná tepelná vodivost [Wm <sup>-3</sup> .K <sup>-1</sup> ]	20°C	1,8 2,2	3	20 25	33 85	50 100	15 25	17 - 110
	1000°C				175			60 - 110
Měrný odpor [Ω.m]	20°C	>10 <sup>7</sup>	>10 <sup>7</sup>		0,1			10 <sup>11</sup>
	1000°C	0,6	0,6					
Maximální teplota užití [°C]		1100	1100	1700	1700	1800	1400	1600
Pozn.: 1) částečně stabilizovaný ZrO <sub>2</sub> , 2) polykrystalický tetragonální ZrO <sub>2</sub> , 3) rekrytalizovaný, 4) reaktivně slinutý, 5) tlakově slinutý.								

### 1.6.1 Dělení keramických materiálů podle lomového chování

Keramické materiály jsou někdy děleny podle lomového chování do těchto skupin (při pokojové teplotě): [6]

- zcela křehké - nejsou schopny plastické deformace při pokojové teplotě ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiC}$ ,  $\text{SiC}$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ),
- křehké (polokřehké) – jsou schopny omezené plastické deformace při pokojové teplotě ( $\text{MgO}$ ,  $\text{ZrO}_2$ ),
- houževnaté – v současné době nelze do této skupiny zařadit žádný prakticky použitelný keramický materiál.

U výrazně křehkých materiálů je pevnost v tahu nereprodukovatelná – nelze ji považovat pouze za materiálovou vlastnost. Závisí na těžce kontrolované velikosti trhlin a na vlastnosti, která určuje odpor materiálu vůči šíření trhlin. Měření pevnosti v tahu by mělo velký rozptyl. Proto se u keramickým materiálů zpravidla pevnost v tahu neudává. U měření pevnosti v ohybu je rozptyl naměřených hodnot menší, ale také ji nelze považovat pouze za materiálovou vlastnost. Pevnost v tlaku je u keramických materiálů celkem vysoká a lépe reprodukovatelná, jelikož povrchové trhliny mají na ni menší vliv.

S narůstající teplotou u keramických materiálů klesá ohybová pevnost (nejprve pozvolna, za vysokých teplot rychleji). Ve srovnání s kovovými materiály má sice keramika nižší pevnost za studena, ale uchovává si ji až do značně vysokých teplot, kdy u kovů pevnost prudce klesne. [1]

### 1.6.2 Faktory snižující pevnost keramiky

- strukturní defekty atomárních a subatomárních defektů,
- vady a koncentrátoři napětí příslušející mikrostruktuře,
- povrchové mikrotrhlinky a vady,
- trhlinky a vady způsobené nesprávným technologickým postupem. [6]

tab. 6 Vlastnosti řezné keramiky různých výrobců [6], [11]

Výrobce	Označení	$\rho$ [g.cm <sup>-3</sup> ]	Zrnitost [ $\mu$ m]	Tvrdost [HRA]	Pevnost v ohybu [MPa]		$\alpha$ [10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ]
CeramTec (Feldmühle)	SN56	3,91	<3	2400	350	4,4	
	SN60	3,97	<2	2200	600	5,5	7,3
	SN76	3,96	<3	2400	400	5,0	
	SN80	4,10	<2	2000	650	6,6	7,4
	SH1	4,30	<2	2400	600	5,0	7,0
	SH20	4,28	<2	2100	400	5,2	7,0
	SH20F		<2		600	5,0	
	FH3	4,20	<2	2800	360	4,9	
	SH100	3,20	<3	1800	720	7,0	2,3
Iscar	IS8	3,3	2-5	91,7	800		
Kennametal	AC5	4,0	1,8	1750	500		7,8
	K060	4,0	3	93,4	700		8,2
	K090	4,3	1-2	95,0	910		8,3
	KY2000	3,3		93,5	760		3,2
	KY2100	3,2		93,5	650		
	KY3000	3,3		93,2	850		
	KY3500	3,2		93,5	1275		
	MC2	4,4	1,5	2000	600		7,7
	MC3	3,8		2000	650		
Mitsubishi	XD202	4,3		94,0	880		
	XD515	3,2		92,0	1080		
	XD805						
	XE9						
NGK Spark Plug	CX3	4,0	2-4	93,5	500		
	HC1	4,0	2-4	93,5	700		
	HC2	4,3	1-2	94,5	800		
	HC6	4,7	2-3	94,0	800		
	SX2	3,2	1-4	93,5	1100		
	SX8	3,2	1-4	93,0	1200		
Sandvik Coromant	CC620	4,0	3	1650	550		
	CC650	4,3	3	1800	550		

	Označení	$\rho$ [g.cm <sup>-3</sup> ]	Zrnitost [ $\mu$ m]	Tvrdost [HRA]	Pevnost v ohybu [MPa]	$\alpha$ [10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ]
Sandvik Coromant	CC670	3,7		2000	900	
	CC690	3,2	3	1450	800	
	GC1690	3,2	3	1560	750	
Toshiba Tungaloy	FX950	3,27		92,7	950	
	FX960	3,30		92,8	1100	
	LX11	4,30		94,0	900	
	LX21	4,24		94,3	800	7,6
	LXA	3,98		94,0	500	7,9
	RX10	6,05		91,3	1200	
	RX55	5,00		92,8	2000	

## 1.7 Použití řezné keramiky

Nasazení řezné keramiky ve strojírenské výrobě vyžaduje dodržení určitých zásad, které zaručí využití výhodných vlastností keramiky a potlačení jejich nevýhodných vlastností. [2]

### Hlavní podmínky efektivního využití řezné keramiky:

- vysoká tuhost systému stroj – nástroj – obrobek (zamezení kmitání jakéhokoliv druhu, které zvyšuje intenzitu opotřebení nástroje),
- použití výkonných obráběcích strojů se širokým rozsahem posuvů a otáček s možností nastavení vysokých řezných rychlostí,
- výborný stav obráběcího stroje,
- zabezpečení pevného a spolehlivého upnutí obrobku,
- zakrytování pracovní části obráběcího stroje,
- výběr vhodného tvaru a velikosti břitové destičky,
- správná volba tvaru ostří břitové destičky,
- překonání nedůvěry k novému nástrojovému materiálu u technologa i pracovníka, který stroj obsluhuje.



### **1.7.1 Soustružení**

Jednotliví výrobci nástrojů z řezné keramiky uvádějí doporučené řezné podmínky. U většiny keramických vyměnitelných břitových destiček je zakázáno chlazení nástroje chladící kapalinou. Při obrábění tvrdých materiálů, jako jsou kalené oceli nebo tvrzené litiny, je potřeba volit poměrně nízké hodnoty hloubky řezu apod. [2]

### **1.7.2 Frézování**

Ve svých počátcích vývoje a výroby byly keramické nástroje doporučovány a používány pro obrábění nepřerušovaným řezem, čili soustružením. Dalším vývojem však došlo k zlepšování vlastností keramických materiálů a to zapříčinilo, že většina výrobců doporučuje keramické řezné materiály i pro obrábění přerušovaným řezem – jako je frézování. Podmínkou je zajištění dostatečné tuhosti soustavy stroj – nástroj – obrobek, a tedy zamezení vibrací. Toho lze dosáhnout použitím frézovacích hlav osazených vyšším počtem břitů. [2]

## 2 METODIKA TESTOVÁNÍ V PODMÍNKÁCH PŘERUŠOVANÉHO ŘEZU

U výrobců i uživatelů se v praxi používají obráběcí testy informující o podmínkách obrábění. Byly vyvinuty testy spolehlivosti pomocí soustružení přerušovaným řezem, které se provádí na speciálních přípravcích (obr. 8, obr. 9). Testování nástrojového materiálu v podmínkách přerušovaného řezu klade díky proměnného mechanického a tepelného zatížení vysoké nároky především na houževnatost nástrojového materiálu. [3]

**způsob testování:**

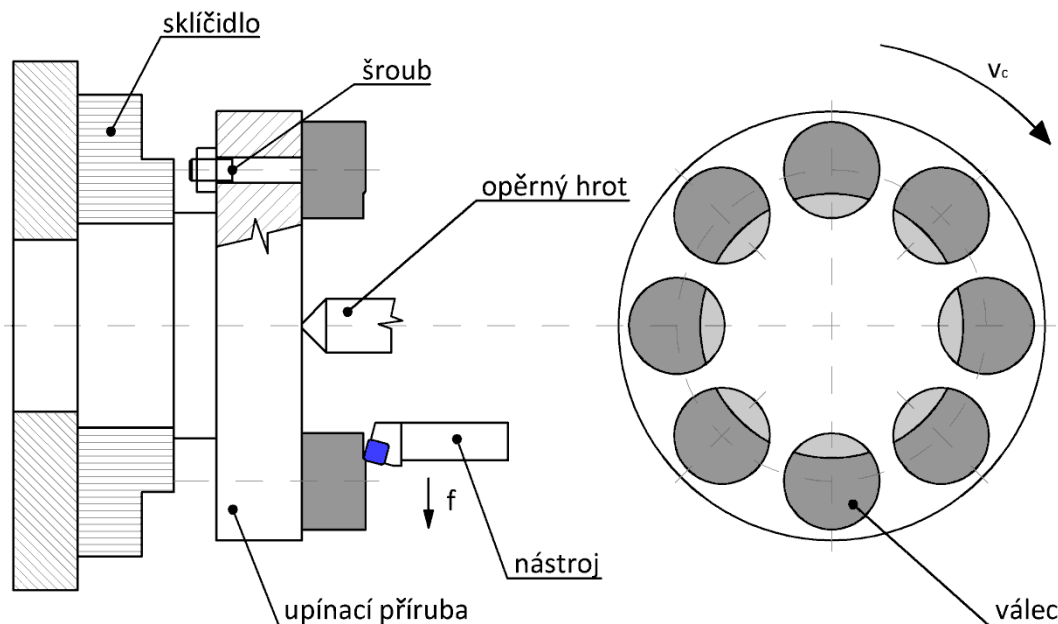
- příčné soustružení (čepový test),
- podélné soustružení (lištový test).

### 2.1 Příčné soustružení

Tato zkouška spočívá v soustružení válečků, které jsou rovnoměrně upnuty po kružnici do přípravku (obr. 8). Válečky jsou upnuty silou, která zamezí jejich prokluzu. Přípravek je upnut do sklíčidla a podepřen opěrným hrotem. Při testu se soustruží příčně od středu směrem k obvodu desky. Břit testovaného nástroje je vystaven rázům, jejichž počet odpovídá počtu upnutých válečků.

Tento způsob testování je vhodný pouze pro porovnávání řezných materiálů různých výrobců a druhů mezi sebou, jelikož při této zkoušce zůstávají neměnné pouze hloubka řezu  $a_p$  a posuv  $f$ . Řezná rychlost  $v_c$  je proměnná. Na základě údajů, které tato zkouška stanovuje, nelze stanovit doporučené řezné podmínky pro konkrétní případ soustružení s přerušovaným řezem.

Výhodou této zkoušky je časová nenáročnost s relativně nízkými nároky na zkušební materiál. [3]



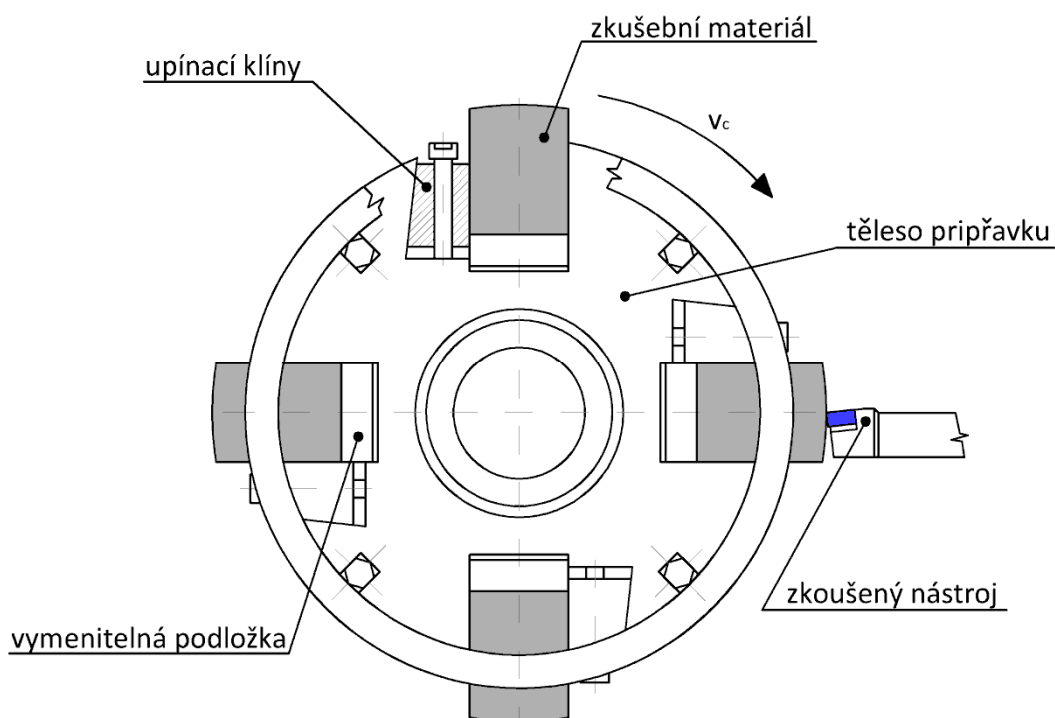
obr. 8 Schéma přípravku pro příčné soustružení přerušovaným řezem [8]

## 2.2 Podélné soustružení

Tento test se provádí s přípravkem, který byl speciálně vyroben v laboratořích katedry obrábění a montáže (obr. 9). V tělese přípravku jsou upnuty čtyři lišty. Lišty se podkládají podložkami, které slouží k udržení stálého rezného průměru. Lišty jsou připevněny prostřednictvím klínových čelistí, které zachycují odstředivou sílu. Tyto čelisti jsou zešikmeny, aby tak působily na lišty přitlačnou silou. K přípravku se připevňují šrouby. Kvůli bezpečnosti jsou na obou čelech přípravku přišroubovány pojistné kroužky, které při nedostatečném upnutí zabraňují zranění obsluhy soustruhu a jiným škodám, ke kterým by mohlo dojít při uvolnění lišt.

Výhoda tohoto řešení spočívá ve snadné vyměnitelnosti lišt. Mohou se tak používat různé materiály lišt.

Testovaný nástroj se při testu posouvá v podélném směru od hrotu ke sklíčidlu soustruhu. Během jedné otáčky je zkoušený břit vystaven čtyřem rázům při vnikání do lišt. Před prvním měřením je potřeba odřezat první vrstvu třísky. Toto nám zaručí konstantní hloubku řezu při podélném soustružení. [3]



obr. 9 Schéma přípravku pro podélné soustružení přerušovaným řezem [8]

## 2.3 Vliv mechanických rázů

Velmi důležitým faktorem hodnocení břitových destiček je odolnost vůči mechanickým rázům. Důsledkem cyklického namáhání dochází k porušení břitu lomem nebo vydrolením. Cyklické namáhání vzniká nejčastěji při podmínkách přerušovaného řezu, avšak vzniká i v podmínkách řezu plynulého. Důvodem je kolísání hlavní složky řezné síly. V tomto případě je frekvence kolísání závislá na charakteru vzniklé třísky.

Mechanické rázy vznikají vnikáním břitu do obrobku nebo při přerušovaném řezu, kdy dochází k nárůstu hlavní složky řezné síly. Tento nárůst může dosáhnout někdy až násobku střední hodnoty hlavní složky řezné síly po vniknutí břitu do obrobku. Doba vnikání břitu do obrobku závisí na vzájemné poloze čela nástroje a povrchu obrobku. Čím je vřezávání břitu na plný průřez třísky pozvolnější, tím menší je nárůst řezné síly. Pokud dojde k prvnímu kontaktu mezi břitem v celém průřezu třísek najednou, je doba vnikání teoreticky nulová a nárůst řezné síly dosáhne maxima. Na čele řezných destiček je místo, kde vzniká křehké porušení. Je to místo, kde dojde k prvnímu dotyku nástroje s obrobkem. [7]

### 3 VLASTNÍ METODA ZKOUŠENÍ

Pro provedení zkoušek byla zvolena metoda podélného soustružení (tzv. lištový test) na simulátoru přerušovaného řezu.

#### 3.1 Řezné parametry

Měření probíhalo při dvou zvolených řezných rychlostech na materiálu 12 050. Posuv se měnil v rozmezí  $f=(0,15 - 0,30)$  mm. Obráběný střední průměr  $D=260$  mm.

tab. 7 Řezné parametry

	$V_{c1}$	$V_{c2}$
Řezná rychlost $V_c$ [m.min <sup>-1</sup> ]	408	539
Otáčky $n$ [min <sup>-1</sup> ]	500	660
Posuv $f$ [mm]	0,15 – 0,30	0,15 – 0,30
Hloubka řezu $a_p$ [mm]	1	1

#### 3.2 Materiál obrobku

Jako materiál lišt byla zvolena ocel 12 050.

tab. 8 Chemické složení oceli 12 050

C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
0,42	0,50	0,17	max.	max.	max.	max.	max.
0,50	0,80	0,37	0,25	0,30	30	0,040	0,040

tab. 9 Mechanické vlastnosti oceli 12 050

Mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Tažnost [%]	Tvrдост [HB]	Modul pružnosti v tahu [GPa]
min. 325	min. 540	min. 17	max. 225	211

### 3.3 Testované keramické destičky

Byly testovány čtyři druhy keramických destiček společnosti Kyocera Industrial Ceramics Corp.

- Kyocera KS6000,
- Kyocera PT600M,
- Kyocera A66N,
- Kyocera A65.

tab. 10 Vlastnosti jednotlivých keramických destiček

	Kyocera KS6000	Kyocera PT600M	Kyocera A66N	Kyocera A65
Barva	šedá	černá	zlatá	černá
Použitelnost	K (litiny)	K (litiny), H (tvrdé materiály)	K (litiny), H (tvrdé materiály)	K (litiny), H (tvrdé materiály)
Složení	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + TiC	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + TiC	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + TiC
Lomová houževnatost [MPa.m <sup>1/2</sup> ]	6,5	4,1	4,1	4,5
Pevnost v ohybu [MPa]	1230	980	980	780
Tvrдост [GPa]	15,7	20,1	20,1	20,6

	Kyocera KS6000	Kyocera PT600M	Kyocera A66N	Kyocera A65
Oblasti používání	Těžké obrábění litin, přerušovaný řez (s chlazením i bez chlazení)	Hrubování tvrdých materiálů, obrábění tvrdých materiálů na čisto	Hrubování tvrdých materiálů, obrábění tvrdých materiálů na čisto	Hrubování litin a tvrdších materiálů, obrábění litin a tvrdších materiálů na čisto

### 3.4 Obráběcí stroj

Pro zkoušení keramických destiček byl použit univerzální soustruh ZMM Sliven. Tento soustruh má dostatečný výkon k úspěšnému provedení zkoušek a má dostatečnou tuhost.



obr. 10 Obráběcí stroj ZMM Sliven

### 3.5 Přípravek pro simulaci přerušovaného řezu

Tento přípravek byl speciálně vyroben v laboratořích katedry obrábění a montáže (obr. 11). Do přípravku se upevňují čtyři lišty, které jsou zajištěné klínovými čelistmi. Čelisti jsou zkosené, aby působily na lišty přitlačnou silou.



obr. 11 Přípravek pro simulaci přerušovaného řezu

### 3.6 Nástrojový držák

Pro testovací účely nám posloužil nástrojový držák CSRNR 2525M-12CE

### 3.7 Vyhodnocovací zařízení

Snímky opotřebení destičky byly pořízeny mikroskopem Itracomicro. Mikroskop byl napojen na počítač, kde byly přes potřebný software pořízeny snímky opotřebení destiček.



### 3.8 Sledování počtu rázů

Z důvodu časové náročnosti byla stanovená kritická hodnota počtu rázů  $R=6000$ . Při dosažení této kritické hodnoty se ukončilo testování keramické destičky a destička byla prohlášena za „vyhovující“. Kritická hodnota počtu rázů odpovídá pro každý posuv jiné obrobené délce (tab. 11).

Vztah pro výpočet počtu rázů:

$$R = \frac{4 \cdot l}{f} \quad (1)$$

$R$  – počet rázů do vyštípnutí [rázy]

$l$  – obrobená délka [mm]

$f$  – posuv [mm]

tab. 11 Obrobená délka při kritické hodnotě rázů

Posuv $f$ [mm]	Obrobená délka $l$ [mm]	Počet rázů $R$ [-]
0,15	225	6000
0,20	300	6000
0,25	375	6000
0,30	450	6000

## 4 VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ ZKOUŠEK

Naměřené a zjištěné hodnoty jsou zapsány v tabulkách. Hodnota uvedená v tabulkách je aritmetickým průměrem tří měření.

### 4.1 Kyocera KS6000

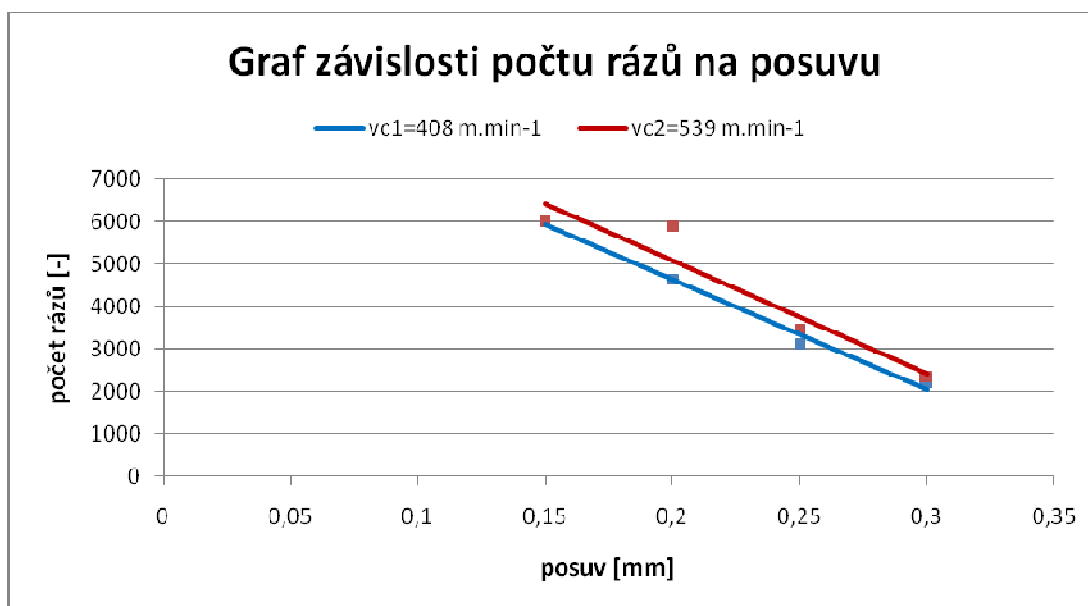
Řezná destička byla testována při dvou řezných rychlostech,  $v_{c1}=408 \text{ m.min}^{-1}$  a  $v_{c2}=539 \text{ m.min}^{-1}$  a různých posuvech  $f$ . Sledovala se vzdálenost  $l$ , kterou destička obrobila do zničení. Pokud se destička zničila dříve, než dosáhla kritické vzdálenosti (kritický počet rázů), počet rázů byl vypočten ze vztahu (1). Výsledné hodnoty jsou zapsány v tabulkách (tab. 12, tab. 13).

tab. 12 Naměřené hodnoty pro destičku Kyocera KS6000 pro řeznou rychlost  $v_{c1}$

$v_{c1}=408 \text{ m.min}^{-1}$			
$f$ [mm]	$l$ [mm]	$R$ [-]	Označení destičky
0,15	225	6000	5.
0,20	232	4640	5..
0,25	195	3120	6.
0,30	166	2213	6..

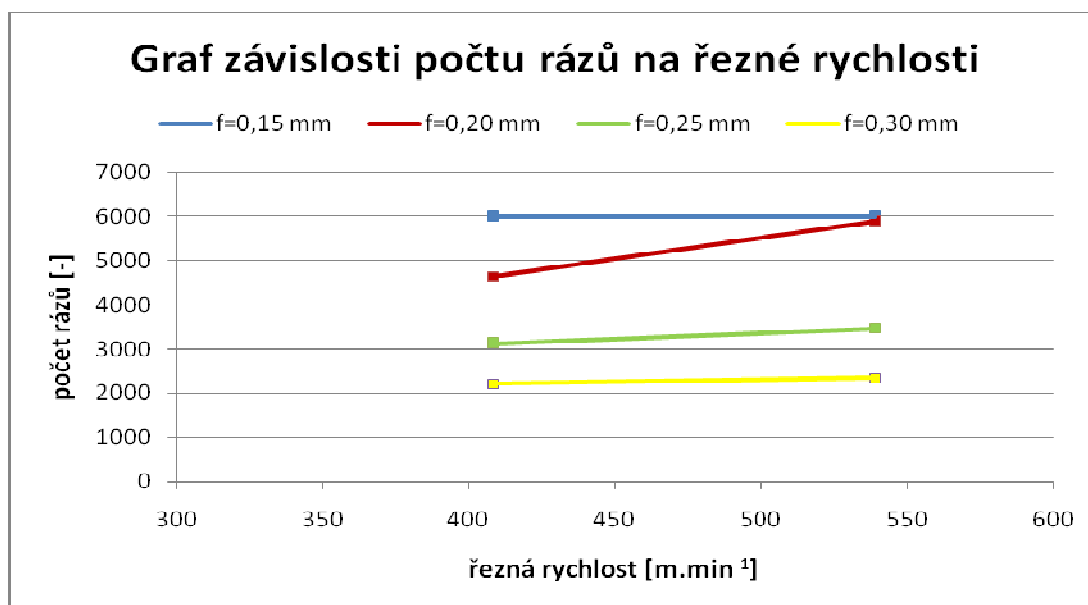
tab. 13 Naměřené hodnoty pro destičku Kyocera KS6000 pro řeznou rychlost  $v_{c2}$

$v_{c2}=539 \text{ m.min}^{-1}$			
$f$ [mm]	$l$ [mm]	$R$ [-]	Označení destičky
0,15	225	6000	7.
0,20	295	5900	7..
0,25	217	3472	8.
0,30	176	2347	8..



obr. 12 Graf závislosti počtu rázů na posuvu pro destičku KS6000

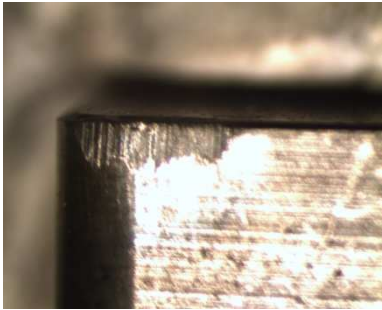

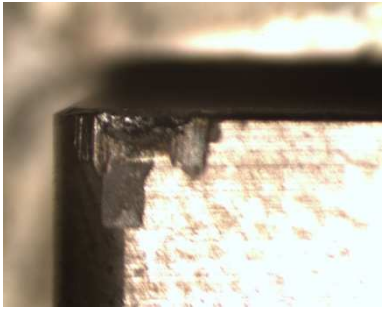
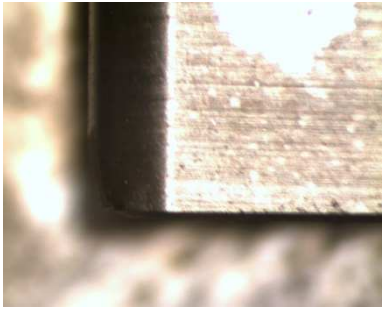
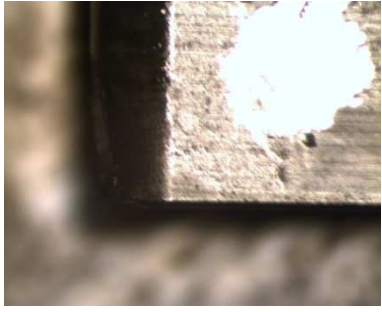
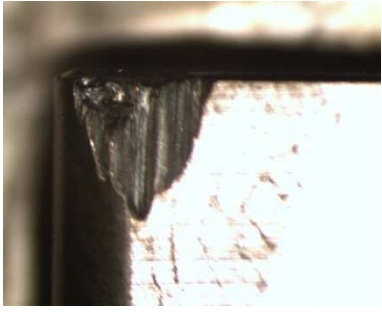
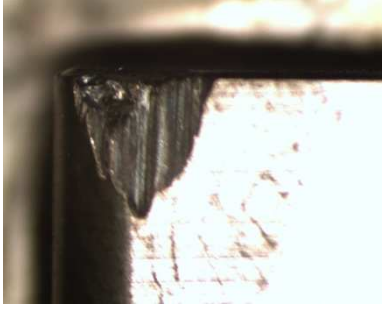
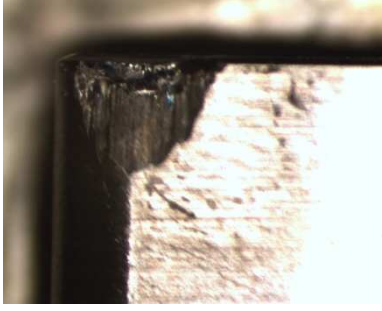
Z grafu závislosti počtu rázů  $R$  na posuvu  $f$  u destičky KS6000 (obr. 12) je patrné, že se vzrůstajícím posuvem počet rázů klesá. Počet rázů klesá téměř rovnoměrně u obou rezných rychlostí.



obr. 13 Graf závislosti počtu rázů na řezné rychlosti pro destičku KS6000

Z grafu závislosti počtu rázů  $R$  na řezné rychlosti  $v_c$  u destičky KS6000 (obr. 13) je zřejmé, že počet rázů vzrůstá s vyšší řeznou rychlostí. Nejstrmější nárůst počtu rázů je při posuvu  $f=0,20 \text{ mm}$ . Dále lze vypožorovat, že čím je posuv  $f$  menší, tím je počet rázů vyšší.

tab. 14 Snímky opotřebení na čele destičky KS6000

Označení destičky		Označení destičky	
5.		5..	
6.		6..	
7.		7..	
8.		8..	

## 4.2 Kyocera PT600M

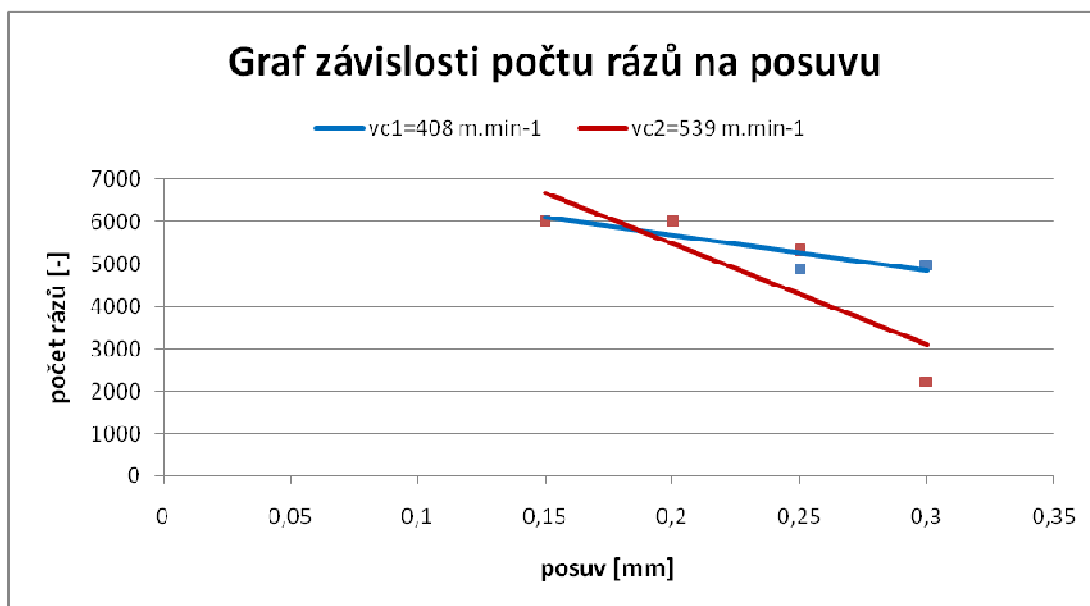
Řezná destička byla testována při dvou řezných rychlostech,  $v_{c1}=408 \text{ m.min}^{-1}$  a  $v_{c2}=539 \text{ m.min}^{-1}$  a různých posuvech  $f$ . Sledovala se vzdálenost  $l$ , kterou destička obrobila do zničení. Pokud se destička zničila dříve, než dosáhla kritické vzdálenosti (kritický počet rázů), počet rázů byl vypočten ze vztahu (1). Výsledné hodnoty jsou zapsány v tabulkách (tab. 15, tab. 16).

tab. 15 Naměřené hodnoty pro destičku Kyocera PT600M pro řeznou rychlost  $v_{c1}$

$v_{c1}=408 \text{ m.min}^{-1}$			
$f$ [mm]	$l$ [mm]	$R$ [-]	Označení destičky
0,15	225	6000	5•
0,20	300	6000	5••
0,25	306	4896	6•
0,30	373	4973	6••

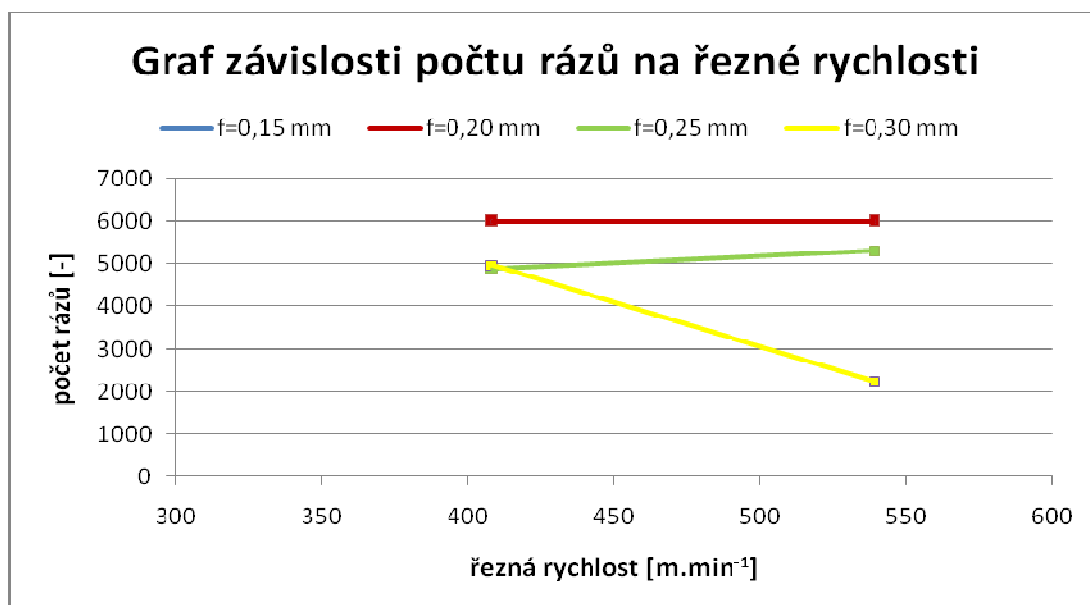
tab. 16 Naměřené hodnoty pro destičku Kyocera PT600M pro řeznou rychlost  $v_{c2}$

$v_{c2}=539 \text{ m.min}^{-1}$			
$f$ [mm]	$l$ [mm]	$R$ [-]	Označení destičky
0,15	225	6000	7•
0,20	300	6000	7••
0,25	332	5312	8•
0,30	168	2240	8••



obr. 14 Graf závislosti počtu rázů na posuvu pro destičku PT600M

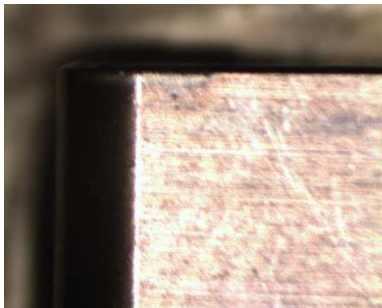
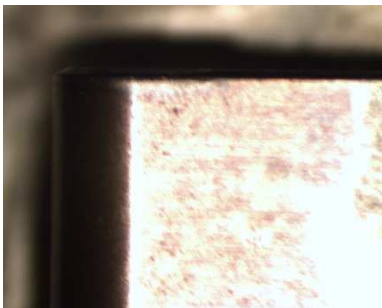

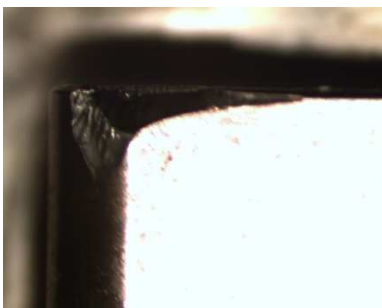
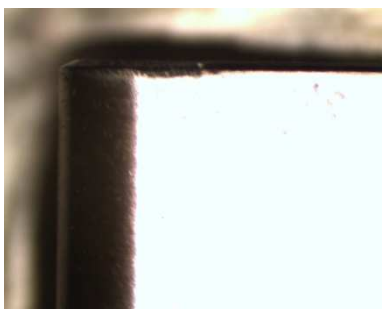

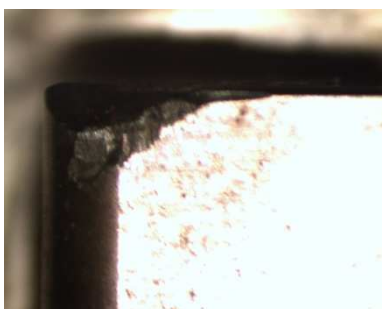

Z grafu závislosti počtu rázů  $R$  na posuvu  $f$  u destičky PT600M (obr. 14) je vidět, že opět se vzrůstajícím posuvem počet rázů klesá. Počet rázů klesá strměji při vyšší řezné rychlosti  $v_{c2}$ .



obr. 15 Graf závislosti počtu rázů na řezné rychlosti pro destičku PT600M

Z grafu závislosti počtu rázů  $R$  na řezné rychlosti  $v_c$  u destičky PT600M (obr. 15) lze pozorovat, že při posuvech  $f=0,15$  mm a  $f=0,20$  mm je počet rázů stejný. Při posuvu  $f=0,25$  mm počet rázů stoupá se vzrůstající řeznou rychlostí. Naopak při posuvu  $f=0,30$  mm počet rázů strmě klesá se vzrůstající řeznou rychlostí.

tab. 17 Snímky opotřebení na čele destičky PT600M

Označení destičky		Označení destičky	
5-		5..	
6-		6..	
7-		7..	
8-		8..	

### 4.3 Kyocera A66N

Řezná destička byla testována při dvou řezných rychlostech,  $v_{c1}=408 \text{ m.min}^{-1}$  a  $v_{c2}=539 \text{ m.min}^{-1}$  a různých posuvech  $f$ . Sledovala se vzdálenost  $l$ , kterou destička obrobila do zničení. Pokud se destička zničila dříve, než dosáhla kritické vzdálenosti (kritický počet rázů), počet rázů byl vypočten ze vztahu (1). Výsledné hodnoty jsou zapsány v tabulkách (tab. 18, tab. 19).

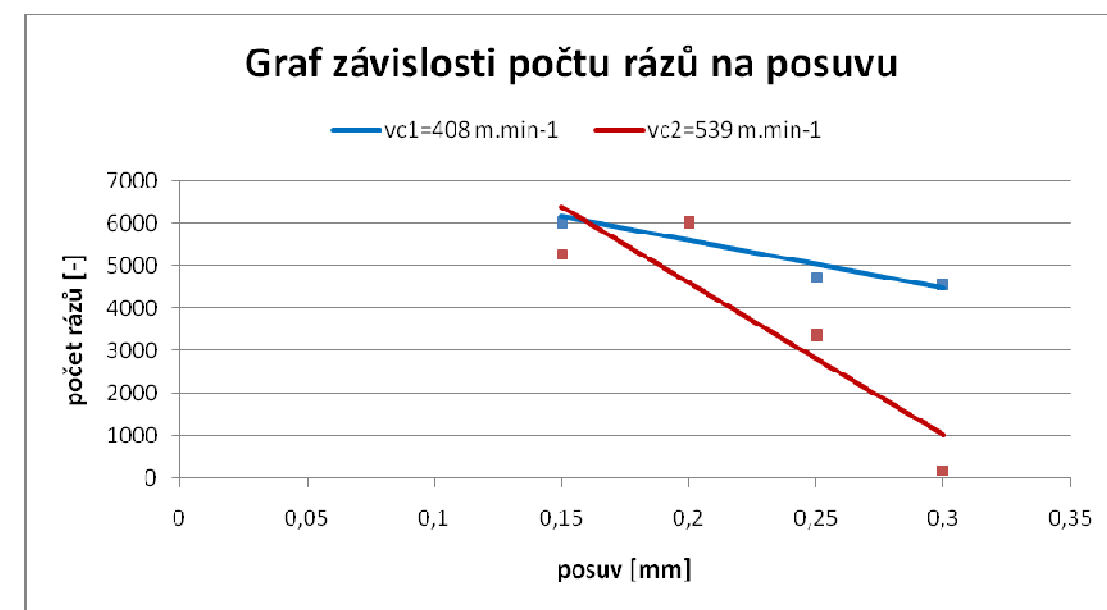
tab. 18 Naměřené hodnoty pro destičku Kyocera A66N pro řeznou rychlost  $v_{c1}$

$v_{c1}=408 \text{ m.min}^{-1}$			
$f$ [mm]	$l$ [mm]	$R$ [-]	Označení destičky
0,15	225	6000	5·
0,20	300	6000	5..
0,25	295	4720	6·
0,30	341	4547	6..

tab. 19 Naměřené hodnoty pro destičku Kyocera A66N pro řeznou rychlost  $v_{c2}$

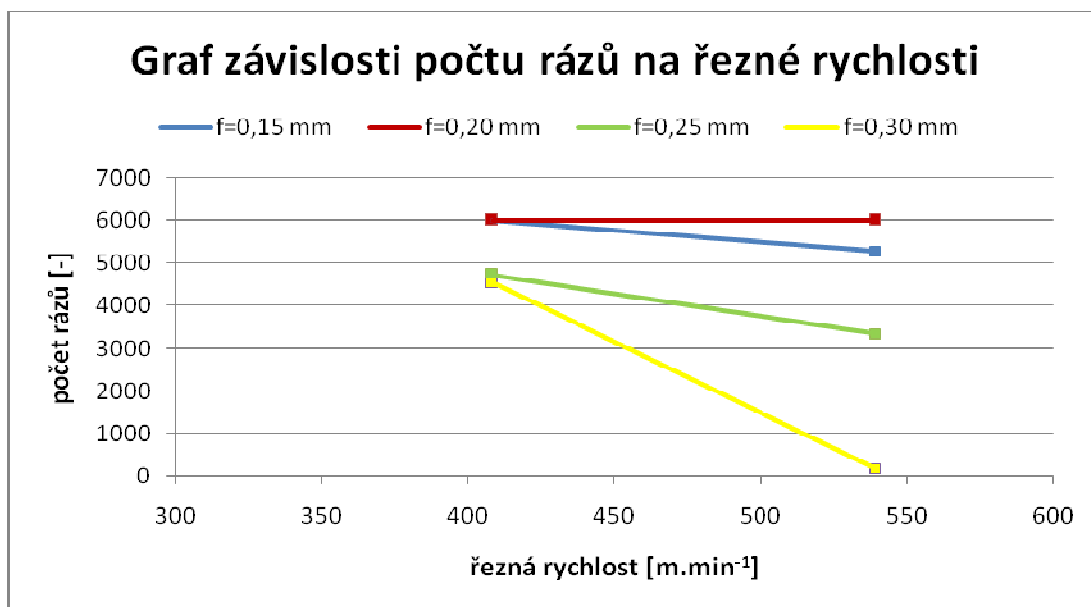
$v_{c2}=539 \text{ m.min}^{-1}$			
$f$ [mm]	$l$ [mm]	$R$ [-]	Označení destičky
0,15	198	5280	7·
0,20	300	6000	7..
0,25	209	3344	8·
0,30	14	187	8..





obr. 16 Graf závislosti počtu rázů na posuvu pro destičku A66N

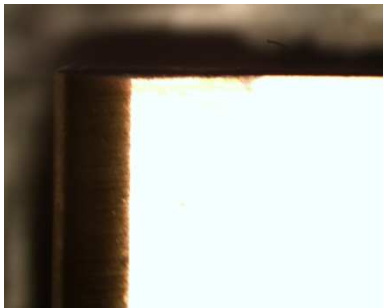
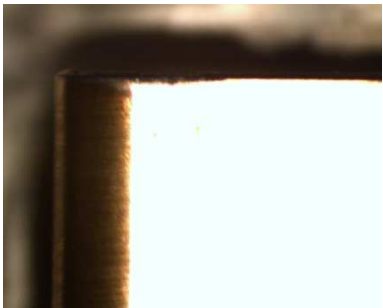

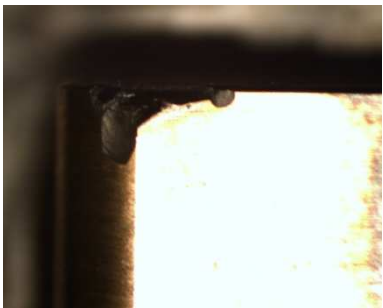
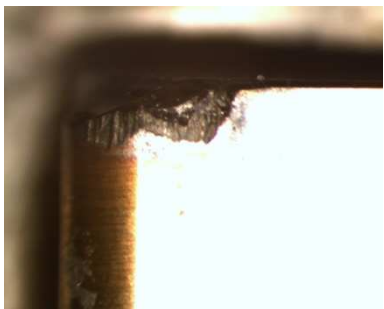
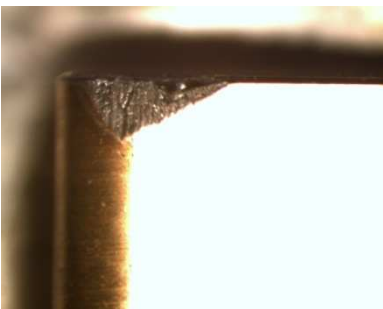


Z grafu závislosti počtu rázů  $R$  na posuvu  $f$  u destičky A66N (obr. 16) je patrné, že znova se vzrůstajícím posuvem počet rázů klesá. Počet rázů klesá výrazně strměji při vyšší řezné rychlosti  $v_{c2}$ .



obr. 17 Graf závislosti počtu rázů na řezné rychlosti pro destičku A66N

Z grafu závislosti počtu rázů  $R$  na řezné rychlosti  $v_c$  u destičky A66N (obr. 17) je vidět, že počet rázů s rostoucí řeznou rychlostí klesá. Nejvíce je to patrné při posuvu  $f=0,30$  mm. Výjimku tvoří posuv  $f=0,20$  mm, kdy počet rázů je při obou řezných rychlostech stejný.

tab. 20 Snímky opotřebení na čele destičky A66N

Označení destičky		Označení destičky	
5.		5..	
6.		6..	
7.		7..	
8.		8..	

## 4.4 Kyocera A65

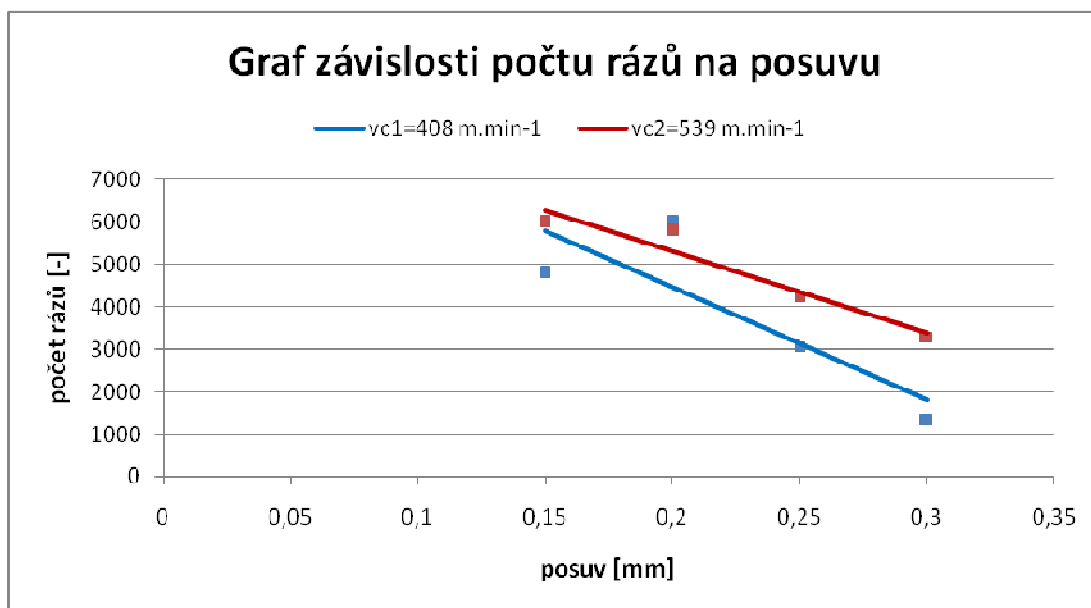
Řezná destička byla testována při dvou řezných rychlostech,  $v_{c1}=408 \text{ m.min}^{-1}$  a  $v_{c2}=539 \text{ m.min}^{-1}$  a různých posuvech  $f$ . Sledovala se vzdálenost  $l$ , kterou destička obrobila do zničení. Pokud se destička zničila dříve, než dosáhla kritické vzdálenosti (kritický počet rázů), počet rázů byl vypočten ze vztahu (1). Výsledné hodnoty jsou zapsány v tabulkách (tab. 21, tab. 22).

tab. 21 Naměřené hodnoty pro destičku Kyocera A65 pro řeznou rychlost  $v_{c1}$

$v_{c1}=408 \text{ m.min}^{-1}$			
$f$ [mm]	$l$ [mm]	$R$ [-]	Označení destičky
0,15	180	4800	5•
0,20	300	6000	5••
0,25	191	3056	6•
0,30	101	1347	6••

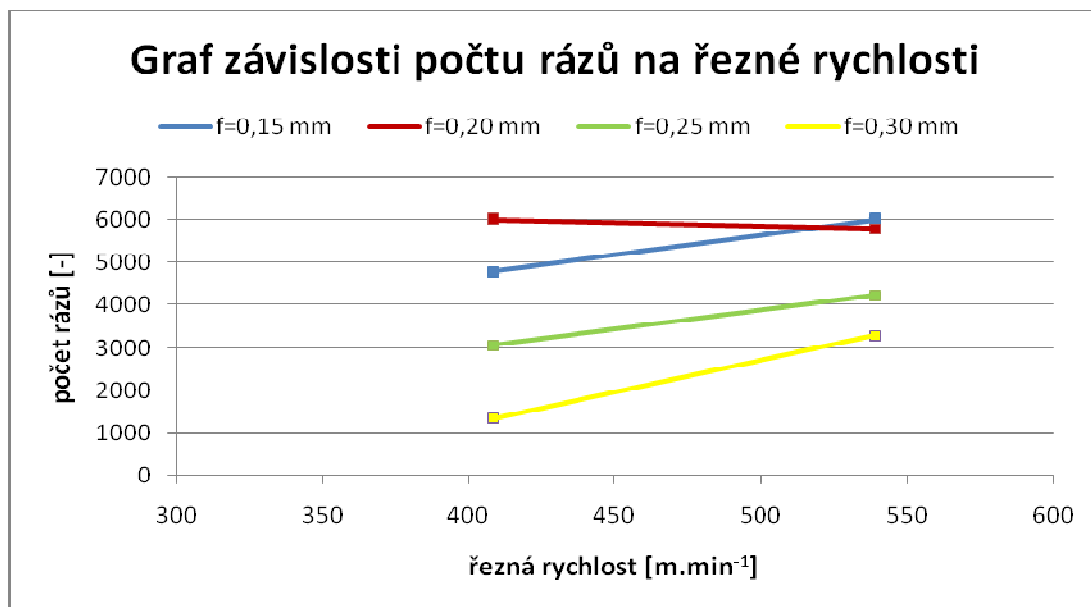
tab. 22 Naměřené hodnoty pro destičku Kyocera A65 pro řeznou rychlost  $v_{c2}$

$v_{c2}=539 \text{ m.min}^{-1}$			
$f$ [mm]	$l$ [mm]	$R$ [-]	Označení destičky
0,15	225	6000	7•
0,20	290	5800	7••
0,25	264	4224	8•
0,30	247	3293	8••



obr. 18 Graf závislosti počtu rázů na posuvu pro destičku A65



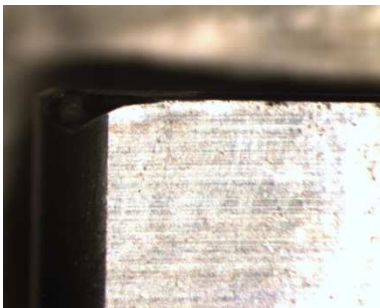

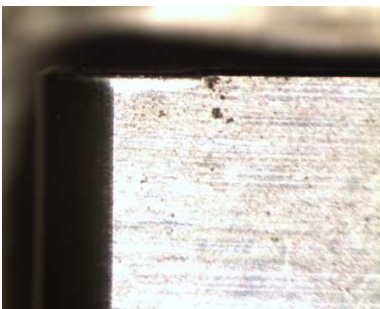



Z grafu závislosti počtu rázů  $R$  na posuvu  $f$  u destičky A65 (obr. 18) je možno sledovat, že opět se vzrůstajícím posuvem počet rázů klesá. V tomto případě počet rázů klesá strměji při nižší řezné rychlosti  $v_{c1}$ .

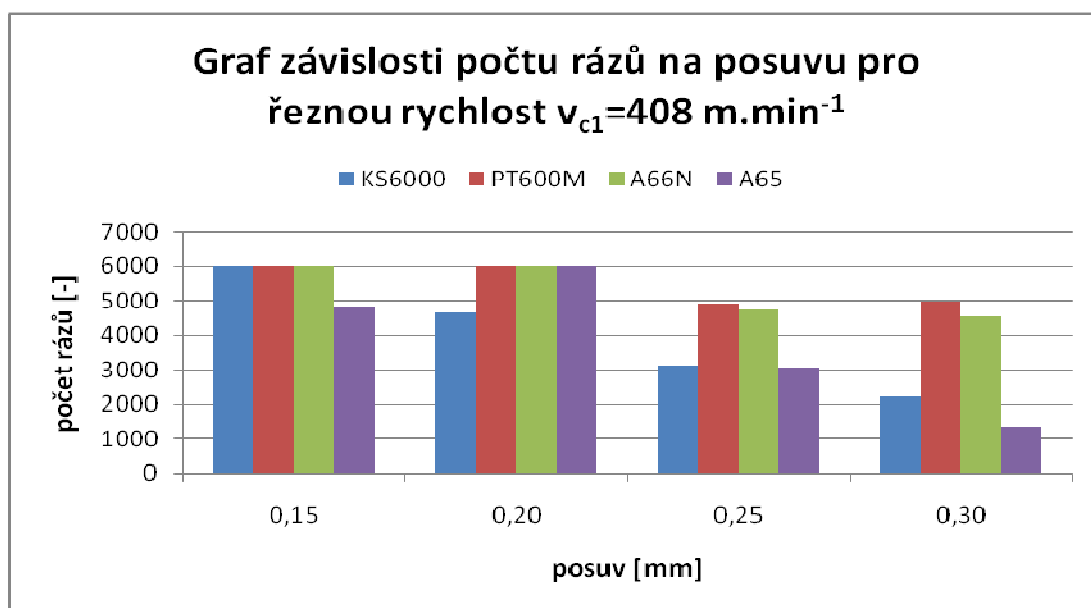


obr. 19 Graf závislosti počtu rázů na řezné rychlosti pro destičku A65

Z grafu závislosti počtu rázů  $R$  na řezné rychlosti  $v_c$  u destičky A65 (obr. 19) je patrné, že se počet rázů zvyšuje s rostoucí řeznou rychlostí. Výjimku tvoří posuv  $f=0,20 \text{ mm}$ , kde počet rázů pozvolna klesá s vyšší řeznou rychlostí.

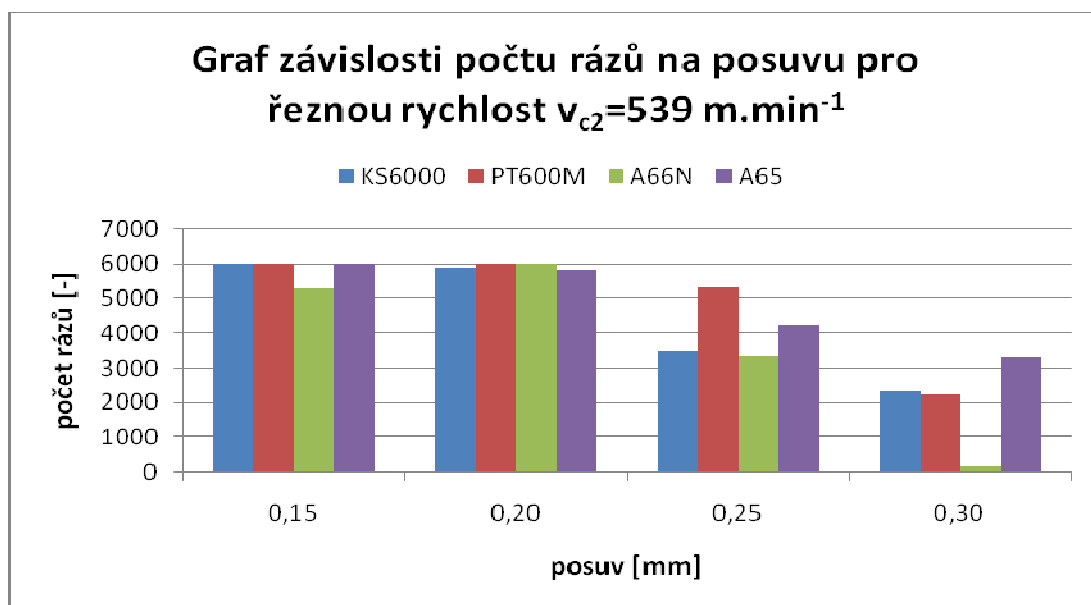
tab. 23 Snímky opotřebení na čele destičky A65

Označení destičky		Označení destičky	
5-		5..	
6-		6..	
7-		7..	
8-		8..	



obr. 20 Graf závislosti počtu rázů na posuvu pro řeznou rychlost  $v_{c1}$

Z grafu závislosti počtu rázů  $R$  na posuvu  $f$  je patrné, že ze všech testovaných druhů keramických destiček pro řeznou rychlost  $v_{c1}=408 \text{ m.min}^{-1}$  nevíce vyhovuje typ PT600M. Nejhorší v tomto testu obstál typ A65.



obr. 21 Graf závislosti počtu rázů na posuvu pro řeznou rychlost  $v_{c2}$

Z grafu závislosti počtu rázů  $R$  na posuvu  $f$  je možno usoudit, že ze všech testovaných druhů keramických destiček pro řeznou rychlost  $v_{c1}=539 \text{ m.min}^{-1}$  nevíce vyhovuje opět typ PT600M. Nejhorší v tomto testu dopadl typ A66N, který při nejvyšším testovaném posuvu  $f=0,30 \text{ mm}$  nedosáhl ani 200 rázů.

## 5 ZÁVĚREČNÉ SHRNU TÍ

Keramické řezné destičky udělaly díky vývoji obrovský pokrok a jsou využívány v mnoha oblastech technické praxe. Zlepšily se také jejich vlastnosti, jako odolnost vůči vysokým teplotám nebo odolnost vůči mechanickému namáhání a opotřeben í. Sami výrobci doporučují řeznou keramiku i pro obrábění přerušovaným řezem.

Cílem této bakalářské práce bylo otestovat schopnost destiček z řezné keramiky při obrábění přerušovaným řezem. Testování bylo prováděno pomocí metody podélného soustružení na simulátoru přerušovaného řezu pro materiál 12 050. Materiál byl obráběn na soustruhu ZMM Sliven, který splňuje požadavky dostatečné tuhosti a přesnosti, potřebné k úspěšnému zvládnutí zkoušek.

Experiment byl prováděn při dvou řezných rychlostech ( $v_{c1}=408 \text{ m.min}^{-1}$  a  $v_{c2}=539 \text{ m.min}^{-1}$ ). Posuv se měnil v rozmezí  $f=(0,15 - 0,30) \text{ mm}$ . Experiment probíhal na řezných keramických destičkách, které dodala společnost Kyocera (KS6000, PT600M, A66N, A65).

Výsledky experimentu jsou zahrnuty v tabulkách a dále byly na mikroskopu Itracomicro pořízeny snímky opotřeben í keramických destiček. Naměřené hodnoty byly graficky zpracovány.

Destička KS6000 vykazuje tyto výsledky. Se zvyšujícím se posuvem klesá počet rázů, které destička vydrží. Pro obě řezné rychlosti klesá počet rázů přibližně stejně. Z grafu závislosti počtu rázů na řezné rychlosti vyplývá, že počet rázů se zvyšuje s vyšší řeznou rychlostí. Pro posuv  $f=0,20 \text{ mm}$  je nárůst počtu rázů nejvyšší. Výjimku tvoří posuv  $f=0,15 \text{ mm}$ , kdy je počet rázů konstantní pro obě řezné rychlosti. Tato destička je tedy nejvíce vhodná pro obrábění vyšší řeznou rychlostí a při nižších posuvech.

Destička PT600M vykazuje tyto výsledky. S rostoucím posuvem klesá počet rázů. Počet rázů klesá více při vyšší řezné rychlosti  $v_{c2}$ . Z grafu závislosti počtu rázů na řezné rychlosti vyplývá, že počet rázů při posuvech  $f=0,15 \text{ mm}$  a  $f=0,20 \text{ mm}$  dosáhl kritické hodnoty 6000 rázů. Při posuvu  $f=0,25 \text{ mm}$  počet rázů pozvolna roste s vyšší řeznou rychlostí. Naopak při posuvu  $f=0,25 \text{ mm}$  počet rázů strmě klesá s vyšší řeznou rychlostí. Tato destička je tedy nejvíce vhodná pro obrábění nižší řeznou rychlostí a při nižších posuvech.

Destička A66N vykazuje tyto výsledky. Počet rázů při vyšších posuvech klesá. Strměji počet rázů klesá s vyšší řeznou rychlostí  $v_{c2}$ . Dále lze pozorovat, že počet rázů klesá s vyšší řeznou rychlostí. Při posuvu  $f=0,30 \text{ mm}$  klesá počet rázů nejvýrazněji.

Výjimku tvoří posuv  $f=0,20$  mm, kdy je počet rázů konstantní pro obě řezné rychlosti. Tato destička je tedy nejvíce vhodná pro obrábění nižší řeznou rychlostí a při nižších posuvech.

Destička A65 vykazuje tyto výsledky. Počet rázů klesá s vyšším posuvem. Počet rázů klesá strměji při nižší řezné rychlosti  $v_{c1}$ . Dále počet rázů se zvyšuje s vyšší řeznou rychlostí. Výjimku tvoří posuv  $f=0,20$  mm, kdy počet rázů s vyšší řeznou rychlostí klesá. Tato destička je tedy nejvíce vhodná pro obrábění vyšší řeznou rychlostí a při nižších posuvech.

Na základě zkoušení bylo prokázáno, že testované keramické destičky lze úspěšně použít i pro obrábění přerušovaným řezem.



## Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Robertovi Čepovi, Ph. D. za odborné vedení a konzultace během studia.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha : MM Publishing Praha, 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-5.
- [2] JURKO, Jozef; ZAJAC, Jozef; ČEP, Robert. *Top trendy v obrábění : II. část - Nástrojové materiály*. Žilina : MEDIA/ST, 2006. 193 s. ISBN 80-968954-2-7.
- [3] ČEP, Robert. *Zkoušky nástrojů z řezné keramiky v podmínkách přerušovaného řezu*. Ostrava, 2005. 101 s. Disertační práce. FS VŠB-TUO.
- [4] HUMÁR, Anton. *Technologie I : Technologie obrábění - 1. část*. Brno : Vysoké učení technické, ústav strojírenské technologie , 2003. 138 s.
- [5] HUMÁR, Anton. *Slinuté karbidy a řezná keramika*. Brno : CCB Brno, 1995. 460 s. ISBN 04-246-86.
- [6] HUMÁR, Anton. *Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění*. 1. vydání. Brno : CCB spol s.r.o., 1995. 265 s. ISBN 80-85825-10-4.
- [7] MRKVA, Petr. *Sledování počtu rázů při obrábění materiálu 12050 řeznou keramikou během přerušovaného řezu a jejich závislost na řezných parametrech*. Ostrava, 2007. 59 s. Diplomová práce. FS VŠB-TUO.
- [8] REINER, Jan. *Zkoušky nástrojů z řezné keramiky na simulátoru přerušovaného řezu*. Ostrava, 2009. 73 s. Diplomová práce. FS VŠB-TUO.
- [9] LEE, X.S. *Ceramic cutting tools - An Introduction*. Key Engineering Materials . 1994, vol. 96, pp. 1-18.
- [10] Lang T. a kol. . *Řezná keramika*. TST -VUNAR,Nové Zámky. OBIS VTELINPRO Praha ve spolupráci s TPS ČR VIDEOPRESS – MON Praha 1987. 148 s.
- [11] BROOKES, K.J.A. *World Directory and Handbrook of Hardmetals and Hard Materials* .Sixth Edition. Hertfordshire, United Kingdom: International Carbide Data, 1994. 211 + 531 p. ISBN 0-9508995-4-2.
- [12] *NIPPON TUNGSTEN CO. LTD* [online]. Application of HIP Technology. c2006 [cit.2010-03-26].  
Dostupné z WWW: <<http://www.nittan.co.jp/en/tech/techinfo/hip.html>>.
- [13] JONES, M.I., HIRAO, K., HYUGA, H.,YAMAUCHI, Y., KANZAKI, S. *Wear properties of Y- $\alpha$ / $\beta$  composite sialon Ceramics*. Journal of the European Ceramic Society. 23(2003). p. 1743-1750. ISSN 0955-2219.

- [14] VŠCHT Praha, Ústav skla a keramiky. *Technologie keramiky – 9. Neoxidová keramika* [online]. c2003 [cit. 2010-03-26]. Dostupné z WWW: <[http://www.vscht.cz/sil/keramika/Ceramic\\_Technology/SM-Lect-9C.pdf](http://www.vscht.cz/sil/keramika/Ceramic_Technology/SM-Lect-9C.pdf)>.
- [15] TEKELI, S. *High temperature ductility and cavitation behaviour of hot isostatically pressed (HIP)  $ZrO_2/Al_2O_3$  composite containing 40 wt.%  $Al_2O_3$* . *Ceramics International*. 29(2003). p. 169-174. ISSN 0272-8842.
- [16] JUROŠ, M. *Zkoušky nástrojů houževnatosti vyměnitelných břitových destiček z řezné keramiky při přerušovaném řezu*. Ostrava, 2008. 47 s. Diplomová práce. FS VŠB-TUO.
- [17] KYOCERA Corporate. *General Catalog* [online]. c2010 [cit. 2010-04-29]. Dostupné z WWW: <[http://www.kyoceraeurope.com/index/products/cutting\\_tools/general\\_catalog.htm](http://www.kyoceraeurope.com/index/products/cutting_tools/general_catalog.htm)>.

## SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

tab. 1 - Vývoj keramických materiálů na bázi $\text{Al}_2\text{O}_3$ [9] .....	7
obr. 1 - Rozdělení řezné keramiky .....	8
obr. 2 - Keramika $\text{Al}_2\text{O}_3$ [4] .....	8
obr. 3 - Keramika $\text{Al}_2\text{O}_3 + 15\%\text{ZrO}_2$ [4] .....	8
obr. 4 - Keramika $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$ [4] .....	9
obr. 5 - Keramika $\text{Si}_3\text{N}_4$ [4] .....	9
obr. 6 - Keramika typu Sialon [4] .....	9
obr. 7 - Počet a velikost dutin a pórů v keramice $\text{ZrO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ [15] .....	11
tab. 2 - Vliv HIP na mechanické vlastnosti keramik [12] .....	12
tab. 3 - Změna mechanických vlastností keramických materiálů po aplikování metody HIP [6] .....	13
tab. 4 - Teploty tavení a tvrdost podle Vickerse pro vybrané keramické materiály [6] .....	15
tab. 5 - Vybrané fyzikální vlastnosti některých keramických materiálů [6] .....	15
tab. 6 - Vlastnosti řezné keramiky různých výrobců [6], [11] .....	18
obr. 8 - Schéma přípravku pro příčné soustružení přerušovaným řezem [8] .....	22
obr. 9 - Schéma přípravku pro podélné soustružení přerušovaným řezem [8] .....	23
tab. 7 - Řezné parametry .....	24
tab. 8 - Chemické složení oceli 12 050 .....	24
tab. 9 - Mechanické vlastnosti oceli 12 050 .....	25
tab. 10 - Vlastnosti jednotlivých keramických destiček .....	25
obr. 10 - Obráběcí stroj ZMM Sliven .....	26
obr. 11 - Přípravek pro simulaci přerušovaného řezu .....	27
tab. 11 - Obrobená délka při kritické hodnotě rázů .....	28
tab. 12 - Naměřené hodnoty pro destičku Kyocera KS6000 pro řeznou rychlost $v_{c1}$ .....	29
tab. 13 - Naměřené hodnoty pro destičku Kyocera KS6000 pro řeznou rychlost $v_{c2}$ .....	29
obr. 12 - Graf závislosti počtu rázů na posuvu pro destičku KS6000 .....	30
obr. 13 - Graf závislosti počtu rázů na řezné rychlosti pro destičku KS6000 .....	30
tab. 14 - Snímky opotřebení na čele destičky KS6000 .....	31
tab. 15 - Naměřené hodnoty pro destičku Kyocera PT600M pro řeznou rychlost $v_{c1}$ .....	32
tab. 16 - Naměřené hodnoty pro destičku Kyocera PT600M pro řeznou rychlost $v_{c2}$ .....	32
obr. 14 - Graf závislosti počtu rázů na posuvu pro destičku PT600M .....	33
obr. 15 - Graf závislosti počtu rázů na řezné rychlosti pro destičku PT600M .....	33
tab. 17 - Snímky opotřebení na čele destičky PT600M .....	34
tab. 18 - Naměřené hodnoty pro destičku Kyocera A66N pro řeznou rychlost $v_{c1}$ .....	35

tab. 19 - Naměřené hodnoty pro destičku Kyocera A66N pro řeznou rychlost $v_{c2}$ .....	35
obr. 16 - Graf závislosti počtu rázů na posuvu pro destičku A66N .....	36
obr. 17 - Graf závislosti počtu rázů na řezné rychlosti pro destičku A66N.....	36
tab. 20 - Snímky opotřebení na čele destičky A66N .....	37
tab. 21 - Naměřené hodnoty pro destičku Kyocera A65 pro řeznou rychlost $v_{c1}$ .....	38
tab. 22 - Naměřené hodnoty pro destičku Kyocera A65 pro řeznou rychlost $v_{c2}$ .....	38
obr. 18 - Graf závislosti počtu rázů na posuvu pro destičku A65.....	39
obr. 19 - Graf závislosti počtu rázů na řezné rychlosti pro destičku A65 .....	39
tab. 23 - Snímky opotřebení na čele destičky A65 .....	40
obr. 20 - Graf závislosti počtu rázů na posuvu pro řeznou rychlost $v_{c1}$ .....	41
obr. 21 - Graf závislosti počtu rázů na posuvu pro řeznou rychlost $v_{c2}$ .....	41